

PINNOITUKSEN VAIKUTUS KAUPUNKIMAAPERÄN
HIILEN JA TYPEN VARASTOITUMISEEN KYLMÄSSÄ
ILMASTOSSA

PETER IMMONEN

HELSINGIN YLIOPISTO
BIO- JA
YMPÄRISTÖTIETEELLINEN
TIEDEKUNTA
EKOSYSTEEMIT JA YMPÄRISTÖ-
TUTKIMUSOHJELMA
PRO GRADU-TUTKIELMA
24.3.2020



Tiedekunta – Fakultet – Faculty Bio- ja ympäristötieteellinen tiedekunta		Koulutusohjelma – Utbildningsprogram – Degree Programme Ekosysteemit ja ympäristö-tutkimusohjelma	
Tekijä – Författare – Author Peter Immonen			
Työn nimi – Arbetets titel – Title Pinnoituksen vaikutus kaupunkimaaperän hiilen ja typen varastoitumiseen kylmässä ilmastossa			
Oppiaine/Opintosuunta – Läroämne/Studieinriktning – Subject/Study track Ekosysteemit ja ympäristö			
Työn laji – Arbetets art – Level Pro gradu-tutkielma		Aika – Datum – Month and year 24.3.2020	Sivumäärä – Sidoantal – Number of pages 23
Tiivistelmä – Referat – Abstract			
<p>Maaperän fysikaaliset, kemialliset ja biologiset ominaisuudet tarjoavat lukuisia ekosysteemipalveluja, joista erityisesti haitallisten yhdisteiden, mukaan lukien hiilidioksidin, sidonta on saanut paljon huomiota ilmastomuutosta hillitsemään potentiaalinsa tähden. Orgaanisten ja epäorgaanisten yhdisteiden varastointi on tärkeää etenkin kaupungeissa, jotka kuuluvat suurimpiin kasvihuonekaasujen päästölähteisiin. Kaupunkien vihermaat kuuluvat tehokkaimpiin sitojiin runsaiden orgaanisen aineen varantojensa ansiosta, minkä lisäksi ne tuottavat useita muita paikallisia ekosysteemipalveluja sekä toimivat virkistysalueina.</p> <p>Vihermaat vähenevät kuitenkin jatkuvan rakentamisen vuoksi, kun niitä peitetään esimerkiksi asfaltilla ja mukulakivillä, minkä seurauksena myös pinnoitetun kaupunkimaaperän merkitystä on alettu tutkia. Selvitysten mukaan pinnoitettu maa on hiili- ja typpivarannoiltaan selkeästi pinnoittamattomia vihermaita niukempi, mikä johtuu fyysisen esteen rajoittavasta vaikutuksesta kaasujenvaihtoon ja veden läpäisyyteen. Lisäksi hiilen (C) ja typen (N) sidonnassa ja ravinnekierrossa olennainen pintamaa poistetaan ja korvataan C:n ja N:n osalta niukemmalla rakennusmaalla. On tärkeää selvittää, kuinka nämä muutokset vaikuttavat kaupunkimaaperän kykyyn sitoa ilmakehän hiiltä ja haitallisia yhdisteitä ja ylläpitää ainekiertoja.</p> <p>Tutkimuksessani tarkastelin pinnoitetun kaupunkimaan ominaisuuksia Helsingissä, sillä Suomen kaltaisilla kylmillä alueilla tutkimukseen perustuvaa tietoa ei käytännössä ole. Tätä varten keräsin maanäytteen 11 katutyöojasta kahdelta eri syvyydeltä rakennusmaasta. Näytteistä mitattiin kokonaishiili ja -typpi, hiilen ja typen suhdeluku (C/N), orgaanisen aineen määrä, kosteusprosentti, pH, maahengitys ja tiheys (engl. bulk density). Vertailin maan ominaisuuksia syvyyksien, pinnoitetun ja pinnoittamattoman maan sekä kylmien ja lämpimämpien alueiden välillä, minkä lisäksi laskin tulosten perusteella pinnoitetun ja pinnoittamattoman maan C- ja N-varastot Helsingin keskustassa sekä pinnoitteen osuuden maa-alasta. Aikaisempien tutkimusten perusteella laadin 3 hypoteesia:</p> <ol style="list-style-type: none">1) Pinnoitetun maan C- ja N-pitoisuudet ovat selkeästi pienempiä pinnoittamattomaan maahan nähden.2) Pinnoitetussa maassa C- ja N-pitoisuuksien erot kahden syvyyden välillä ovat tasaisemmat kuin pinnoittamattomassa maassa, sillä C- ja N-rikas pintamaa on vaihdettu niukempaan rakennusmaahan ja pinnoite estää karikkeen tuomaa C:tä ja N:ä kulkeutumasta ja keskittymästä pintamaahan.3) Kylmillä alueilla pinnoitteen aiheuttama C- ja N-hävikki on suurempi kuin lämpimämmillä alueilla paksumman rakennusmaakerroksen vuoksi. <p>Odotusten mukaisesti 1) pinnoitetun maan C- ja N-pitoisuudet olivat pienemmät kuin pinnoittamattomassa maassa, 2) pinnoitetun maan C- ja N-pitoisuudet pysyivät tasaisina eri syvyyksillä verrattuna pinnoittamattomaan maahan ja 3) Helsingin C- ja N-hävikki on suurempi verrattuna aiempiin tutkimustuloksiin lämpimämmistä maista. Kaikkien kolmen tarkastelukohdan tulokset ovat yhdistettävissä maanvaihdon ja pinnoituksen aiheuttamiin muutoksiin. Muidenkin muuttujien tulokset vastasivat kirjallisuuden luomia ennakkokäsityksiä. Helsingin C- ja N-varastot ovat myös huomattavasti pienentyneet pinnoitteen lisääntyttyä, mikä heikentää kaupungistuneiden alueiden ekosysteemipalvelupotentiaalia. Tulokset vahvistavat oletuksia pinnoitteen tuomista muutoksista maaperän sitomiskykyyn sekä yleisesti että verrattaessa kylmiä ja lämpimämpiä alueita keskenään.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Kaupunkimaa, pinnoitemaa, vihermaa, hiili, typpi, sidonta, ravinnekierto, ekosysteemipalvelut, kasvihuonekaasut			
Ohjaaja tai ohjaajat –Handledare – Supervisor or supervisors Heikki Setälä ja Changyi Lu			
Säilytyspaikka – Förläggningställe – Where deposited			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

Sisällysluettelo

1. Johdanto	2
2. Aineisto ja menetelmät	6
2.1. Tutkimusalue ja näytteenotto	6
2.2. Maanäytteiden analysointi	8
2.2.1. Hiili, typpi, kosteus ja orgaaninen aine	8
2.2.2. Tiheys ja pH	9
2.2.3. Maahengitys	9
2.3. Tilastollinen testaus ja kuvaajat	10
2.4. Hiilen ja typen varastot maaperätyypeissä ja pinnoitetun alan osuudet ...	10
3. Tulokset	11
3.1. Maaperätyyppien vertailu	11
3.2. Hiilen ja typen varastot maaperätyypeissä ja pinnoituksen vaikutus hiilen ja typen varastoihin kaupunkimaaperässä	13
4. Tulosten tarkastelu	14
4.1.1. C/N-suhde, pH ja tiheys	14
4.1.2. Biologinen aktiivisuus	15
4.2. Hiilen ja typen varastot maaperätyypeissä pinnoitetun alan suhteen	16
4.3. Kylmien ja lämpimämpien alueiden vertailu	17
4.4. Pinnoittamattoman maan kasvihuonepäästöt	18
4.5. Kaupunkisuunnittelu	19
5. Johtopäätökset	20
6. Kiitokset	21
7. Lähteet	21

1. Johdanto

Maaperän kyky sitoa haitallisia orgaanisia ja epäorgaanisia yhdisteitä on yksi tärkeimmistä ekosysteemipalveluista, jonka merkitys korostuu kaupunkiympäristöissä, joissa maaperä ja ilma ovat saastuneita ja jotka tuottavat suuren osan ilmakehän kasvihuonepäästöistä (Lorenz & Lal 2009). Sitomisesta vastaavat viheralueet, kuten puistot, puutarhat ja nurmikot, vähentyvät kuitenkin jatkuvasti tiivistyvän rakentamisen myötä. Maisema- ja virkistysarvon ohella viheralueiden ekosysteemipalveluja ovat mm. meluntorjunta, lämpösaarekkeiden ja niihin kytkeytyvien ilmansaastekeskittymien vähentäminen, tulvimisen tasaus sekä ilman ja hulevesien suodatus. Erityinen huomio on päällystämättömän maan ylläpitämässä ravinnetaloudessa ja potentiaalissa sitoa ilmakehän hiilidioksidia (CO₂). Tasaisen ylläpidon, kuten lannoittamisen ja kastelun, ja vähäisten häiriöiden ansiosta päällystämättömät maat sisältävät runsaasti orgaanista ainetta, joka yhdessä kasvillisuuden ja mikrobien kanssa vastaa yhdisteiden sitomisesta (Pouyat ym. 2006, Lorenz & Lal 2009, Xiong ym. 2014). Tämän myötä vettä läpäisevän kaupunkimaan varastointipotentiaali saattaa olla yhtäläinen tai jopa korkeampi kuin kaupunkien ulkopuolisilla viheralueilla, kuten metsillä, kosteikoilla, laidunmailla, ruohikoilla ja viljelysmailla (Zhao ym. 2013, Xiong ym. 2014). Potentiaalista huolimatta viheralueiden vaikutus kasvihuonekaasujen maailmanlaajuisiin taseisiin on vielä epäselvä, sillä kasvien ja maaperien kasvihuonepäästöt vaihtelevat olosuhteiden mukaan, ja viheralueiden ylläpito voi tuottaa omia kasvihuonepäästöjään (Lorenz & Lal 2009, Churkina ym. 2010, Xiong ym. 2014, Velasco ym. 2016).

Kaupunkien peittämätöntä maata on tutkittu laajasti, mutta pinnoitetun, esimerkiksi asfaltilla tai mukulakivillä peitetyn kaupunkimaaperän tutkimukset ovat jääneet vähäisiksi, ja pohjoismaiden kylmemmissä ilmasto-oloissa tässä työssä esittämäni tutkimus kuuluu aihepiiriin ensimmäisiin. Pinnoitetun maaperän on kuitenkin todettu sisältävän huomattavasti vähemmän hiiltä (C), tyypeä (N),

orgaanista ainetta ja hajotustoimintaa kuin pinnoittamaton maaperä, mikä viittaa pinnoituksen luomaan fyysiseen esteeseen orgaanisen aineen vastaanottamiselle ja muodostumiselle, auringonvalolle, kaasujenvaihdolle ja veden läpäisylle (Scalenghe & Marsan 2009, Wei ym. 2014a). Maaperän pH on puolestaan todettu korkeammaksi pinnoitetussa maassa, minkä syiksi on arvioitu alkalisoivat rakennusmateriaalit ja maaperään leviävien kationiyhdisteiden väheneminen pinnoitteen vuoksi (Wei ym. 2014a, Kida & Kawahigashi 2015). Tältä osin on kuitenkin tarkasteltava käytettävää pinnoitusmateriaalia. Ellei pinnoitusta ole suunniteltu läpäiseväksi, voivat yhdisteet päästä maaperään pohjaveteen liuenneina, mikroflooran ja maaperäfaunan kautta, viereisten maamassojen läpi tunkevista juurista ja kulumisessa pinnoitukseen muodostuvista aukoista (Lorenz & Lal 2009, Wei ym. 2014a, Kida & Kawahigashi 2015, Majidzadeh ym. 2018). Perinteiset pinnoitusmateriaalit voivat kuitenkin vaihdella läpäisevyydeltään ja vaikuttaa eri tavoin maaperän ominaisuuksiin. On myös havaittu, että maan hiilipitoisuudet laskevat mitä kauemmaksi pinnoitteen ala ulottuu sen reunasta, ja korkeiden rakennusten, kuten kerrostalojen, alaiset hiilivarat on arvioitu olemattomiksi. Toisin sanoen laajat pinnoitealat, kuten rakennukset ja parkkipaikat, vastaavat suuremmista maaperän hiilikadoista kuin esimerkiksi kadut ja jalkakäytävät (Majidzadeh ym. 2017, Majidzadeh ym. 2018). Mikäli siis pinnoiteala on riittävän kapea ja sijaitsee viherkaistaleiden yhteydessä, voivat pinnoitetun maaperän hiilivarastot muodostaa kohtuullisen osuuden kaupungin kokonaisvarannoista (Edmondson ym. 2012). Kun pinnoitus on laaja-alaista ja yhtenäistä sen suorat ja epäsuorat vaikutukset voivat olla haitallisia eliöyhteisöille ja niiden toiminnoille. Ne voivat näkyä mm. kasvien tuottavuuden ja elinympäristöjen vähenemisenä, ravintoketjujen muokkautumisena, tulvimisena, vähäisen pintaheijastavuuden luomina lämpösaarekkeina, maaperän saastumisena ja terveysriskeinä sekä edellä mainittujen seurauksena kasvaneina kustannuksina (Scalenghe & Marsan 2009, Setälä ym. 2016, Majidzadeh ym. 2018). Lisäksi runsaasti pinnoitetuilla alueilla hulevesiä ja kaasuja ohjautuu liiaksi vihermaihin,

joissa paikallinen ravinnetalous voi häiriytyä (Scalenghe & Marsan 2009, Raciti ym. 2012).

Fyysisen esteen lisäksi hiilen, ravinteiden ja orgaanisen aineen hävikki voidaan yhdistää rakennusvaiheeseen, jossa alkuperäistä perusmaata siirretään pois esimerkiksi katujen ja rakennusten alaisen maaperän stabiloimiseksi. Siirretyn maan mukana poistuvat sen hiili-, typpi- ja orgaanisen aineen varannot samoin kuin niitä käsittelevät mikrobit, ja aiempi perusmaa korvataan näiden osalta selvästi niukemmalla rakennusmaalla (Lorenz & Lal 2009, Kida & Kawahigashi 2015). Toimenpiteellä voi olla huomattavia ekologisia vaikutuksia maaperän toimintoihin ja sitä kautta ekosysteemipalveluihin, joiden tuottamisessa maan pintakerroksella on olennainen rooli; mainitut varannot ja biologinen aktiivisuus ovat suurimmat pintamaassa, joka vastaanottaa kasvillisuuden kariketta ja muuta biomassaa hajotettavaksi, ja syvemmällä pitoisuudet yleensä laskevat (Setälä ym. 2016). Aineiden siirtymisen ohella on syytä selvittää, kuinka suuri osa hiilestä ja tyypestä poistuu ilmaan mikrobien maahengityksessä ja denitrifikaatiossa (Raciti ym. 2012). Pinnoitteen johdosta kaasuvirtojen merkitys voi tosin olla vähäinen verrattuna muihin poistumistapoihin. Alkuperäisen maaperän korvaava rakennusmaa on myös tiiviimpää ja vähemmän huokoista, mikä osaltaan vaikeuttaa veden ja ilman läpäisyä sekä heikentää ainekiertoa ja maan kykyä varastoida yhdisteitä (Lorenz & Lal 2009). Näiden ongelmien voi olettaa koskevan erityisesti viileitä ja kylmiä alueita kuten Suomea, joissa ”elävä” pintamaa korvataan käytännössä elottomalla, mineraalipitoisella kivimurskeella maaperän routimisen ehkäisemiseksi. Kivimurskeen johdosta rakennusmaakerros voi olla paksumpi kuin lämpimämpien alueiden pinnoitetuissa maissa, mikä tarkoittaa mahdollisesti suurempaa hiili- ja typpihävikkiä. Toinen lämpimien ja kylmien ilmastoalueiden maita erottava tekijä on luonnollisesti lämpötila, joka säätelee maaperän biologista aktiivisuutta (Xiong ym. 2014) ja voi vaikuttaa eri tavoin riippuen maantieteellisestä sijainnista.

Kylmistä ilmasto-oloista johtuen kaupunkialueiden pinnoitettujen, lähinnä sora- ja murskeesta koostuvien maaperien voidaan olettaa olevan poikkeuksellisen niukkoja hiili- ja ravinnevaroiltaan. Tässä tutkimuksessa tarkastelin pinnoitetun kaupunkimaaperän hiili- ja typpivarantoja sekä sen fysikaalis-kemiallis-biologisia ominaisuuksia Helsingissä. Maanäytteistä mitattiin kokonaishiili- ja -typpiprosentti, hiilen ja typen suhdeluku (C/N), orgaanisen aineen määrä, maahengitys, kosteus, pH ja tiheys (engl. bulk density) kahdelta eri syvyydeltä. Selvitin arvoja eri syvyyksillä rakennettua maaperää ja vertasin niitä kirjallisuudesta saatuihin pinnoittamattoman kaupunkimaaperän arvoihin. Lisäksi selvitin hiilen ja typen maavarastot sekä pinnoitetun alan osuudet 1 ja 2 km säteellä Helsingin keskustasta kohti reuna-alueita tarkastellakseni pinnoitealan muutosta ja sen vaikutusta hiilen ja typen varastoihin. Vertasin myös hiilen ja typen määriä lämpimämpien alueiden tutkimuksiin.

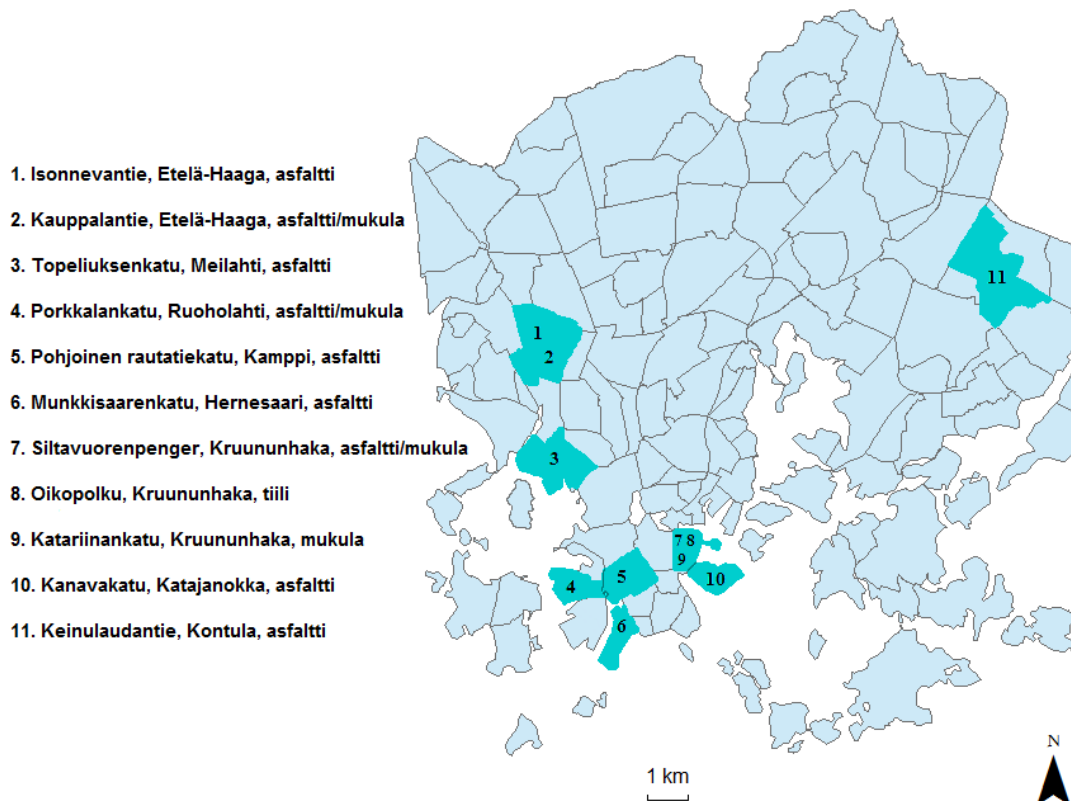
Aiempiin, lämpimämmissä ilmasto-oloissa tehtyihin tutkimuksiin perustuen laadin kolme hypoteesia:

1. Pinnoitetun kaupunkimaaperän hiili- ja typpipitoisuudet ovat selkeästi alhaisemmat kuin pinnoittamattoman kaupunkimaaperän. Näin siksi, että valtaosa pintamaasta on korvattu hiili- ja typpiköyhällä rakennusmaalla.
2. Pinnoitetun maaperän hiili- ja typpimäärien erot kahden syvyyden välillä ovat tasaisemmat kuin pinnoittamattomassa, ”luonnollisessa” maaperässä. Näin siksi, että pintamaan vaihto vähentää pintakerroksen hiilen ja typen määrää ja pinnoite rajoittaa hiilen ja typen kulkeutumista ja keskittymistä pintamaahan tasaten syvyyksien välisiä pitoisuuseroja.
3. Pinnoitetun maaperän hiili- ja typpihävikki on huomattavasti suurempi kylmillä alueilla kuin lämpimämmillä johtuen paksummasta perusmaan korvaavasta rakennusmaakerroksesta.

2. Aineisto ja menetelmät

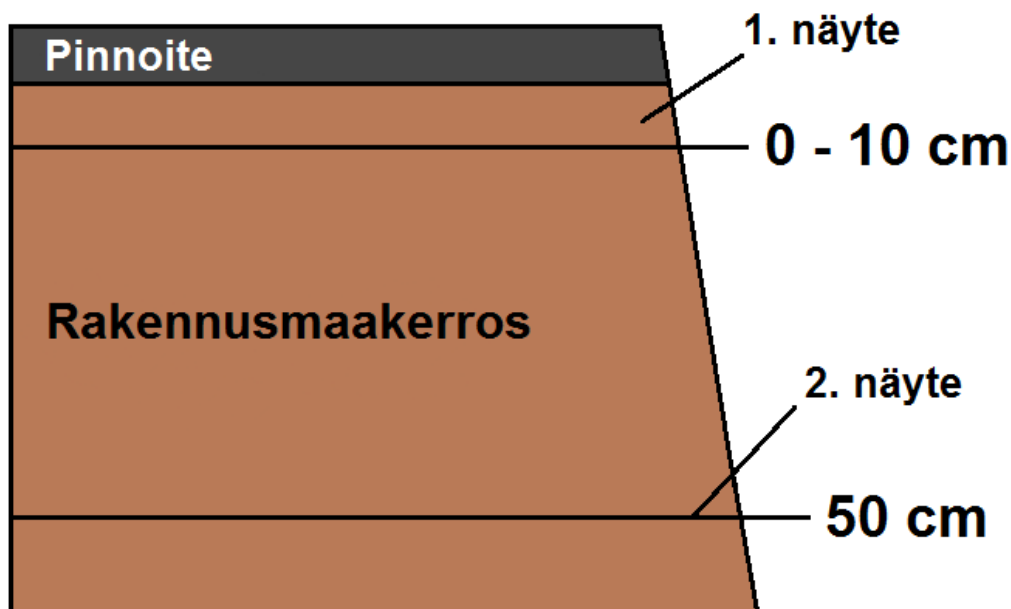
2.1. Tutkimusalue ja näytteenotto

Keräsin maanäytteet kevään ja kesän 2019 aikana yhdeltätoista (11) Helen Oy:n (Helsingin energia) kaukolämpö-, kaukojäähdytys- ja sähkötöihin liittyvästä kaivuukuopasta Helsingissä (Kuva 1). Kaivannot sijaitsivat katualueilla paitsi Oikopolulla, joka on ensisijaisesti jalankulkuväylä. Pinnoitemateriaali oli pääsääntöisesti asfalttia, joskin eräillä alueilla päällystepintana oli osittain mukulakiveä ja kivilaattaa.



Kuva 1. Näytteenottopaikat, kaupunginosat (turkoosilla) ja pinnoitemateriaalit Helsingissä. Numerot eivät kuvaa näytteenottopaikkojen tarkkoja sijainteja.

Pyrin valitsemaan kohteita, joiden olosuhteet määrittivät nimenomaan pinnoitteen mukaan, joten kaivantojen tuli sijaita selkeästi erillään kasvillisuudesta, joka mahdollisesti toisi hallitsematonta vaihtelua maaperän ominaisuuksiin. Poistetun pinnoitteen alaisesta kuoppaseinämästä otin muovisella kauhalla yhden 0,5 l näytteen 0 – 10 cm ja 50 cm syvyyksiltä (Kuva 2). Kuopan syvyys vaihteli näytteenottoaikoissa, mutta kaikissa tapauksissa rakennusmaakerros jatkui syvemmälle kuopan alareunasta. Arvioin Helsingin rakennusmaakerroksen keskimääräiseksi syvyydeksi 2,5 m perustuen silmämääräisiin havaintoihin ja Helen Oy:n tiedonantoon. Rakennusmaakerrokseen sisältyvät lämpö- ja jäähdytysputket, sähkökaapelit, vesijohdot ja viemäriputket. Riittävän syvyyden lisäksi seinämän tuli olla tarpeeksi jyrkkä, jotta ylimääräistä hiekkaa ei kasautuisi ja sekoittuisi tavoiteltavaan maahan. Näytteenottojen välillä puhdistin kauhan ja mittakannun etanolilla. Säilytin näytteitä ilmatiiviissä Minigrip-pusseissa pakastimessa siihen asti, kunnes otin ne sulamaan yöksi ennen analyysia.



Kuva 2. Näytteenottosyvyydet ja kerrokset avatun kulkuväylän läpileikkauksessa. Rakennusmaakerroksen alainen ”luonnollinen perusmaa” oli kaikissa tapauksissa metriä syvemmällä.

2.2. Maanäytteiden analysointi

Ennen analyyseja kunkin näytepussin sisällöstä noin puolet siivilöitiin 2 mm seulan läpi ja seulan läpäissyt maaperä (raekoko < 2 mm) laitettiin uusiin samanlaisiin pusseihin. Laboratoriopäivien välillä alkuperäisiä näytteitä säilytettiin pakastimessa (-20 °C) ja siivilöityjä näytteitä kylmähuoneessa (+4 °C) enintään 52 vuorokauden ajan. Ennen analysointia alkuperäisiä näytteitä sulateltiin kylmähuoneessa vuorokauden ajan. Maaperäanalyysit, lukuun ottamatta tiheyttä ja maahengitystä, tehtiin siivilöidyille näytteille. Maan tiheys (tilavuuspaino) ja mikrobiaktiivisuus määritettiin alkuperäisistä tuoreista maanäytteistä.

2.2.1. Hiili, typpi, kosteus ja orgaaninen aine

Hiili- ja typpipitoisuudet mitattiin siivilöidyistä näytteistä 1350 °C kuivapoltolla LECO CNS-2000-mittauslaitteella, joka havaitsee hiilen kokonaismäärän 0,07 % tarkkuudella ja typen kokonaismäärän 0,09 % tarkkuudella. Kosteusmittausta varten jokaisesta siivilöidystä näytteestä annosteltiin n. 45 g maata alumiinikuppiin. Näytekupeista punnittiin märkäpaino, minkä jälkeen näytteet laitettiin uuniin 80 °C lämpötilaan yhden vuorokauden ajaksi. Uunin jälkeen kuppeja jäähdytettiin eksikaattorissa ennen punnitsemista, minkä jälkeen näytteet siirrettiin Minigrip-pusseihin orgaanisen aineen mittausta varten. Kupit säilytettiin tiheysmittauksia ja -laskuja varten. Orgaanisen aineen osuus määritettiin kuivanäytteistä muhveliuunissa (550 °C, 5 tunnin poltto), jolloin näytteiden sisältämä orgaaninen aine paloi pois. Uunin jälkeen upokkaat jäähdytettiin eksikaattorissa ja punnittiin.

2.2.2. Tiheys ja pH

Jokaisesta alkuperäisestä, siivilöimättömästä näytteestä kerättiin maata 50 ml metallilieriöön siten, että maa painettiin kevyesti lieriöön niin, että se täytti lieriön mahdollisimman tarkasti reunaan asti. Maa kaadettiin lieriöstä alumiinikuppiin. Kuppeja pidettiin uunissa 105 °C lämpötilassa yön yli, minkä jälkeen ne pistettiin eksikaattoriin jäähtymään ja punnittiin. Saatujen massojen avulla laskettiin näytteiden tiheydet (engl. bulk density). pH:n mittaamiseksi siivilöidyistä näytteistä annosteltiin 10 ml maata 100 ml lasipulloihin, minkä jälkeen pulloihin kaadettiin 50 ml tislattua vettä. Pullot ravisteltiin, jätettiin paikoilleen 2 tunniksi ja mitattiin Mettler Toledon pH-mittauslaitteella.

2.2.3. Maahengitys

Alkuperäisistä näytteistä punnittiin 15 g maata 50 ml lasipulloihin. Pullot asetettiin Apollo 9000Hs-mittauslaitteen pullotelineeseen maahengityksessä muodostuvan hiilidioksidin mittaamiseksi. Ennen mittausta maaperän ja mikrobiston annettiin stabiloitua huoneenlämmössä muutaman tunnin ajan. Stabiloitumisen jälkeen pullot suljettiin varovasti septumeilla, jotta hengitysprosessi ei häiriintyisi, ja mittaus aloitettiin. Laitteen injektioneula otti septumin läpi pullojen ilmatilasta 0,5 ml ilmanäytteen, josta mitattiin hiilidioksidipitoisuus. 160 minuutin kuluttua ensimmäisen mittauksen aloituksesta käynnistettiin uusi mittauskierros. Hiilidioksidituotanto laskettiin toisen ja ensimmäisen mittauksen erotuksena, mihin tarvittiin myös injektiotilavuus, kahden mittauksen välinen aika, näytteiden massat ja pullojen ilmatilojen tarkat tilavuudet. Ilmatilavuudet selvitettiin täyttämällä pullo vedellä ja punnitsemalla lisääntynyt massa, jossa 1 g vastasi 1 ml:aa. Maahengitys ilmaistiin hengitysnopeutena ($\mu\text{gC/g maata/h}$).

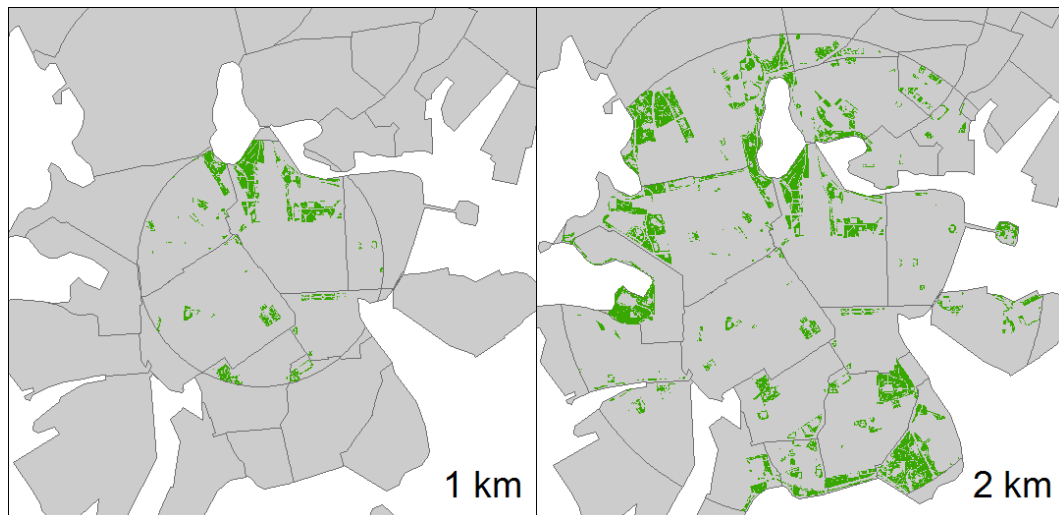
2.3. Tilastollinen testaus ja kuvaajat

Mittaustulosten vertailut suoritin RStudio-ohjelmalla (versio 1.2.5001). Pinnoittamattoman kaupunkimaaperän arvot saatiin kymmenestä (10) helsinkiläisestä puistosta syvyyksiltä 0 – 10 cm ja 21 – 50 cm (Setälä ym. 2016). Vertaillakseni pinnoitetun ja pinnoittamattoman maaperän ominaisuuksia muodostin kuvaajia, jotka esittävät mittaustulosten keskiarvot ja keskihajonnat eri syvyyksillä. Maatyypien sisäisissä syvyysvertailuissa käytin parillista t-testiä. Ennen tätä testasin aineistojen normaalisuuden Shapiro-Wilksin testillä, ja mikäli muuttujien arvot eivät olleet normaalisti jakautuneita, käytin niihin logaritmi- tai neliöjuurimuunnosta. Pinnoitetussa aineistossa hiili, orgaaninen aine, kosteus ja maahengitys olivat normaalisti jakautuneita joko sellaisinaan tai muunnoksilla. Pinnoittamattomassa aineistossa hiili, tyyppi ja orgaaninen aines olivat normaalisti jakautuneita.

2.4. Hiilen ja typen varastot maaperätyypeissä ja pinnoitetun alan osuudet

Hyödynsin edellä mainittuja mittaustuloksia ja kirjallisuudesta (Setälä ym. 2016) saatuja kaupunkipuistojen vastaavia tuloksia selvittääkseni pinnoituksen vaikutusta maaperän hiilen ja typen varastoihin Helsingissä. Tätä varten laskin ensin hiilen ja typen keskimääräiset tiheydet neliömetriä kohden 0 – 250 cm syvyydessä hiilen ja typen prosentuaalisia osuuksia (ts. pitoisuuksia) käyttäen. Laskutuloksista vähensin kivimurskeen osuuden maasta, joka on arviolta 50 % (Changyi Lu ym., julkaisematon), sillä karkean murskeen kyky sitoa hiiltä ja typpeä on vähäinen. Hiili- ja tyypibudjettilaskuissa käytin hiili- ja tyypitiheyksiä (kg/m^2) sekä pinnoitetun ja pinnoittamattoman maan pinta-alatietoja 2 km säteellä Helsingin keskustasta. Jaoin säteen myös kahteen 1 km osaan (sisempi ja ulompi säde), joita vertailin keskenään tarkastellakseni pinnoitetun alan muutosta ja sen vaikutusta varastoihin keskustaa lähestyttäessä. Pinta-alat laskin ArcGIS-

paikkatieto-ohjelmalla (versio 10.3.1.) hyödyntäen Helsingin kaupungin aineistoja kaupunginosista ja viheralueista. Viheraineisto listasi kaikki viherosat kukkaistutuksista ylöspäin yhden neliömetrin tarkkuudella (Kuva 3).



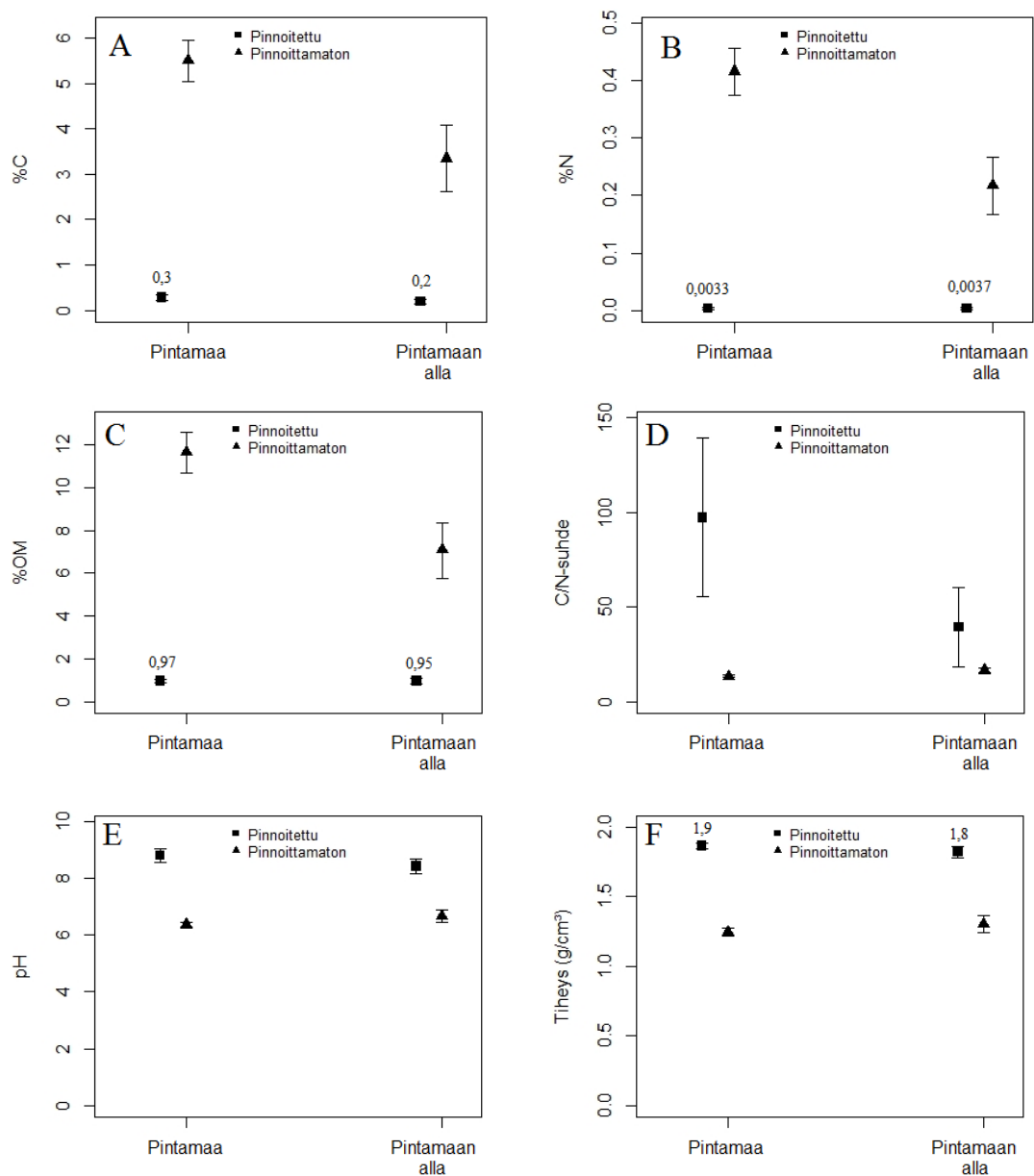
Kuva 3. Pinnoitetun ja pinnoittamattoman maaperän osuudet 1 km säteellä ja 2 km säteellä Helsingin keskustasta. Pinnoittamattomat viheralat on merkitty tummanvihreällä värillä.

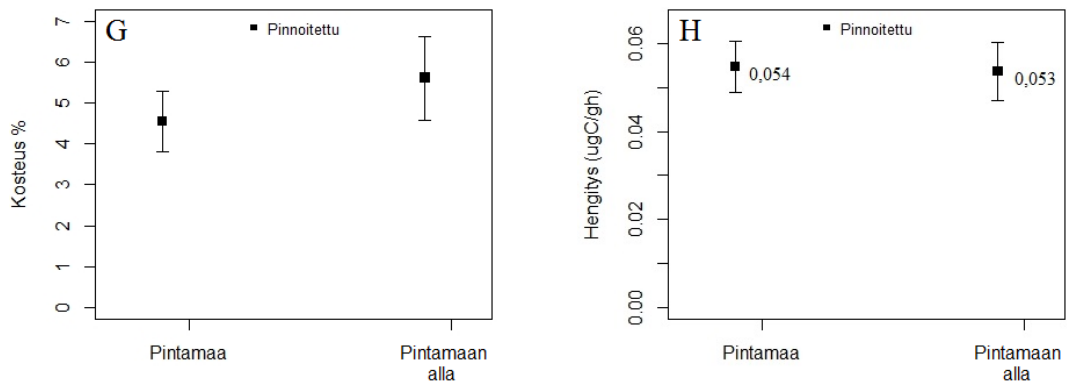
3. Tulokset

3.1. Muuttujien vertailu syvyyksien välillä ja maaperätyyppien vertailu

Pinnoitetussa maaperässä ainoastaan maan pH laski hieman mutta tilastollisesti merkitsevästi ($P=0.048$) siirryttäessä pintamaasta 50 cm syvyyteen. Maaperätyyppien (pinnoitettu vs. pinnoittamaton) välisessä vertailussa pinnoittamattomassa puistomaassa oli selkeästi enemmän hiiltä, typpeä ja orgaanista ainetta: hiilen määrä oli 18-kertainen, typen määrä 45-kertainen ja orgaanisen aineen määrä 9,7-kertainen pinnoitettuun maahan nähden. Sen sijaan C/N-suhde, tiheys ja pH olivat selkeästi korkeammat pinnoitetussa maassa: C/N-luku oli 4,6-kertainen, tiheys 1,4-kertainen ja pH 1,3-kertainen

pinnoittamattomaan maahan nähden (Kuva 4). Osassa pinnoitetuista näytteistä typpipitoisuudet olivat niin pieniä, ettei mittauslaitteen tarkkuus riittänyt analysointiin. Mitattavissa olevat typpipitoisuudetkin olivat hyvin pieniä, varsinkin pinnoitetuissa pintamaakerroksissa.





Kuva 4. Hiilen (A), typen (B), orgaanisen aineen (C), C/N-suhteen (D), pH:n (E), tiheyden (F), kosteuden (G) ja maahengityksen (H) arvot kahdella syvyydellä pinnoitetussa (0 – 10 cm = pintamaa ja 50 cm = pintamaan alla, $n=22$) kaupunkimaassa (*keskiarvo \pm keskihajonta*). Vertailun vuoksi kuvaajissa on näytetty myös pinnoittamattoman (0 – 10 cm = pintamaa ja 21 – 50 cm = pintamaan alla, $n=20$) puistomaaperän vastaavat arvot (Setälä ym. 2016) muuttujien A – F osalta. Osa havainnoista on merkitty niiden tarkoilla arvoilla keskinäisten erojen esiintuomiseksi.

3.2. Hiilen ja typen varastot maaperätyypeissä ja pinnoituksen vaikutus hiilen ja typen varastoihin kaupunkimaaperässä

Myös hiilen ja typen varastot Helsingissä 2 km säteellä keskustasta ovat huomattavasti pienemmät pinnoitetussa maaperässä. Alueen pinnoitetun maa-alan (89,6 % koko maa-alasta) hiilivarastot (49 838 tonnia) ovat 3 kertaa pienemmät kuin pinnoittamattoman maa-alan (10,4 % koko maa-alasta) varastot (145 683 tonnia) ja pinnoitetun maan typpivarastot (1 460 tonnia) 7 kertaa pienemmät kuin pinnoittamattoman maan (10 425 tonnia). Pinnoitetun maan hiilivarastot muodostavat siis 25,5 % ja typpivarastot 12 % kokonaisvarastoista. Pinnoitetun maan osuus kokonaispinta-alasta on 89,6 % 2 km säteellä, 92,8 % keskusta-alueella (sisempi 1 km säde) ja 88 % keskustaa ympäröivällä reuna-alueella (2 km säde ilman keskusta-alueen sädettä). Tämä merkitsee 5 prosenttiyksikön kasvua pinnoitealan suhteellisessa osuudessa siirryttäessä reuna-alueelta keskusta-alueelle. Säteiden vertailussa (sisempi 1 km säde vs. 2 km säde ilman sisempää sädettä) hiilen ja typen määrien erot vihermaan ja pinnoitemaan välillä ovat

keskustassa vähäisemmät kuin reuna-alueella: keskusta-alueella pinnoittamattomassa maassa on hiiltä kaksinkertaisesti ja typpeä 4,8-kertaisesti pinnoitettuun nähden, kun taas reuna-alueella pinnoittamattomassa maassa on hiiltä 3,4-kertaisesti ja typpeä 8-kertaisesti pinnoitettuun nähden.

4. Tulosten tarkastelu

Tulosten perusteella voidaan todeta, että pinnoitetun maaperän hiili-, typpi- ja orgaanisen aineen varannot ovat huomattavasti pienemmät verrattuina pinnoittamattomaan puistomaaperään. Erot pitoisuuksissa eri syvyyksien välillä ovat myös huomattavasti vähäisemmät pinnoitetussa maaperässä verrattuna pinnoittamattomaan: pinnoittamattomien puistojen maaperissä hiilen ($P=0.001$), typen ($P=0.002$) ja orgaanisen aineen määrät ($P=0.007$) sekä C/N-suhde ($P=0.017$) laskivat merkitsevästi syvemmälle siirryttäessä (ks. Setälä ym. 2016). Molemmat ilmiöt ovat yhdistettävissä alkuperäisen pintamaan poistoon ja siihen, että pinnoitus rajoittaa eloperäisten aineiden pääsyä rakennettuun maaperään.

4.1.1. Maaperän C/N-suhde, pH ja tiheys

Typpeä on maaperässä yleisestikin vähän suhteessa hiileen, mikä johtuu hajoavan kasvimateriaalin stoikiometriasta, mutta pinnoitetussa maassa suhde oli epätyypillisen korkea. Raciti ym. (2012) arvelivat ilmiön johtuvan siitä, että pinnoitus katkaisee pintamaan ylä- ja alapuolisen systeemin vuorovaikutuksen, toisin sanoen kasvi-maaperävuorovaikutuksen. He totesivat New Yorkin (Bronx ja Brooklyn) pinnoitetun maan orgaanisen aineen hajoavan hitaasti labiilia ainesta hajottavien entsyymien puutteen vuoksi, mikä yhdessä hajotusmateriaalin vähäisyyden kanssa voisi osaltaan selittää typen alhaisia pitoisuuksia tässäkin tutkimuksessa. Myös Wei ym. (2014b) totesivat pinnoituksen yhteyden

orgaanisen hiilen vähäisyyteen ja poikkeukselliseen C/N-suhteeseen Yixingin kaupungissa itäisessä Kiinassa, mutta heidän tuloksissaan pinnoitetun maan C/N-suhde oli pinnoittamatonta pienempi. Kummassakaan tutkimuksessa ei kuitenkaan havaittu korrelaatiota hiilen ja typen pitoisuuksien välillä pinnoitetussa maassa. Pinnoitetun maan korkeampaa pH:ta on selitetty sekä kationien vähäisellä määrällä pinnoituksen aiheuttaman kationien liikkumiseen vaikuttavan esteen vuoksi että rakennusmateriaalien alkalisoivalla vaikutuksella, esimerkiksi kalsiumyhdisteiden irtoamisella sementistä ja betonista (Kida & Kawahigashi 2015). Kohonnut pH pinnoitetussa maassa saattaa lisätä fosforin liukoisuutta maaperässä, mitä edesauttaa fosforia maasta sitovien kasvien ja huuhtovan veden vähäisyys. Maan pH laskee yleisesti syvemmälle mentäessä, koska etäisyys pinnoitteen alkalisoiviin yhdisteisiin kasvaa. (Kida & Kawahigashi 2015, Majidzadeh ym. 2018). Pinnoitetun maan korkeampi tiheys johtunee tiepohjan rakennusmateriaalin korkeasta mineraaliainespitoisuudesta ja rakennusmaan tiivistämisestä rakennusvaiheessa sekä tiivistymisestä ajan myötä. Tämä selittää osaltaan pinnoitetun maan matalat hiili- ja typpipitoisuudet sekä kosteusarvot.

4.1.2. Biologinen aktiivisuus

Pinnoitetun maaperän maahengitys oli keskimäärin 0,05 $\mu\text{g/g/h}$, ja vaikka vertailuarvoja ei ollut saatavilla puistoaineistosta, voi pinnoitetun maan maahengityksen olettaa johtuvan hiilen, typen ja orgaanisen aineen vähäisyydestä (ks. alla). On oletettavaa, että pinnoittamattomien puistomaiden maahengitys olisi ollut suurempi, sillä hiilen ja orgaanisen aineen lisääntyessä myös hajotusaktiiviteetti lisääntyy (Wei ym. 2014a, Majidzadeh ym. 2018). Tätä tukevat Wei ym. (2014a) Nanjingin kaupungissa itäisessä Kiinassa suorittamat mittaukset, joissa pinnoitetun maan keskimääräinen hengitys oli 0,46 $\mu\text{g/g/h}$ ja pinnoittamattoman 1,32 $\mu\text{g/g/h}$. Pinnoitetun maaperän keskimääräinen kosteus oli 5,1 %, joka on erityisen matala verrattaessa esimerkiksi metsämaan kosteuteen,

joka on kovassakin kuivuudessa noin 10 % luokkaa (Haapoja 2019). Huomattava osa maaperän kosteudesta on varastoituneena orgaaniseen aineeseen (Swift ym. 1979), joten orgaanisen aineen vähäisyys yhdessä pinnoitteen sadevettä estävän vaikutuksen kanssa selittää alhaista kosteutta. Niin ikään kosteus on tärkeä osatekijä mikrobiaktiivisuudessa (Majidzadeh ym. 2018), joten alhainen maan kosteus pinnoitetuissa maissa on vähäisen orgaanisen aineen ohella todennäköinen selittäjä alhaisissa maahengitysarvoissa.

4.2. Hiilen ja typen varastot maaperätyypeissä pinnoitetun alan suhteen

Huomionarvoista on se, kuinka vähäiset pinnoitetun maan hiili- ja typpivarastot (hiiltä 49 838 tonnia ja typpeä 1 460 tonnia) ovat verrattuna pinnoittamattoman maan hiilen (145 683 tonnia) ja typen (10 425 tonnia) varastoihin, vaikka pinnoitetun maan osuus alueen kokonaispinta-alasta 2 km säteellä ydinkeskustasta on 89,6 %. Mikäli alkuperäisen, poistetun pintamaan oletetaan sisältäneen saman verran hiiltä ja typpeä kuin pinnoittamattoman maan, on pinnoitustoimenpiteiden vuoksi menetetty 1 256 284 tonnia hiiltä ja 89 901 tonnia typpeä 2 km säteellä Helsingin keskustasta. Tämä vastaa 8,6-kertaisesti nykyisiä pinnoittamattoman kaupunkimaan hiili- ja typpivarastoja samalla alueella. On mahdollista, että laskemani hiilen ja typen varannot pinnoitettujen alojen kohdalla antavat todellisia lukuja jonkin verran pienemmät arvot. Näin siksi, että valitsin tarkoituksella kohteita, jotka olivat useiden metrien etäisyydellä katupuista ja muusta kasvillisuudesta. Joka tapauksessa pinnoitealan kasvu on selkeästi vähentänyt hiilen ja typen maavarastoja keskusta-alueella suhteessa ympäröivään alueeseen. Menetetyt varastot ja uusien hidas kertyminen pinnoitetussa maassa heikentävät mahdollisesti kaupunkimaaperän elinvoimaisuutta ja kykyä vaimentaa ilmastonmuutoksen vaikutuksia.

4.3. Kylmien ja lämpimämpien alueiden vertailu

Tulosten vertaaminen lämpimämpien maiden tutkimuksiin on haasteellista johtuen vaihtelevista näytteenottosyvyyksistä ja näytemääristä. Tästä huolimatta hiilen ja typen tiheyserot pinnoitetun ja pinnoittamattoman maan välillä poikkeavat suuresti Helsingissä verrattuna lämpimämpien vyöhykkeiden kaupunkeihin. Helsingissä pinnoitetun maan C-tiheys 0 – 2,5 m syvyydessä rakennusmaata on 5,6 kg/m² ja N-tiheys 0,2 kg/m², kun taas pinnoittamattoman maan C-tiheys on 140,8 kg/m² ja N-tiheys 10 kg/m². Tällöin maatyypin välinen ero hiilessä on 25-kertainen ja typessä 62-kertainen. Esimerkiksi pohjoisen, eteläisen ja luoteisen Kiinan ja eräiden Yhdysvaltojen kaupunkien tiheyserot vaihtelevat hiilen osalta välillä 1,4 – 3,3 ja typen osalta välillä 1,3 – 21,4 (Pouyat ym. 2006, Raciti ym. 2012, Wei ym. 2014a, Wei ym. 2014b, Yan ym. 2015, Majidzadeh ym. 2017, Hu ym. 2018, Majidzadeh ym. 2018). Helsingin mittavat erot kahden maatyypin hiili- ja typpimäärässä johtunevat poikkeuksellisen paksusta rakennusmaakerroksesta ja sen aiheuttamasta hiili- ja typpikadosta. Toisin kuin tässä tutkimuksessa, useassa tutkimuksessa havaittiin hiilen ja typen määrien laskevan pinnoitetussa maassa syvemmälle mentäessä (Raciti ym. 2012, Edmondson ym. 2012, Yan ym. 2015, Majidzadeh ym. 2017, Majidzadeh ym. 2018). Koska lämpimämmillä alueilla routimattomasta maaperästä poistetaan rakentamisen yhteydessä vähemmän pintamaata kuin kylmillä alueilla, kattava osa pintakerroksen hiili- ja typpivaroista jää maaperään selittäen pintamaan korkeammat hiili- ja typpipitoisuudet.

Vertailin myös pinnoitetun maan keskimääräisiä hiili- ja typpitiheyksiä 1 m syvyydessä Helsingin ja lämpimämpien maiden välillä. Helsingin C-tiheys (2,2 kg/m²) on suurempi, pienempi tai miltei samansuuruinen kuin lämpimämmissä kaupungeissa. Yhdysvaltojen Alabamassa ja New Yorkissa C-tiheydet vaihtelevat välillä 1 – 1,62 kg/m² (10 – 60 cm näytesyvyydet) merkiten suurimmillaan kaksinkertaista eroa (Raciti ym. 2012, Majidzadeh ym. 2017, Majidzadeh ym.

2018). Sen sijaan Atlantassa, Baltimoressa, Bostonissa, Chicagossa, Oaklandissa, Syracusessa ja New Yorkissa (toinen tutkimus) pinnoitetun maan C-tiheys vaihtelee välillä 3,3 – 9,6 kg/m² (0 – 1 m syvyys) merkiten suurimmillaan 4,3-kertaista eroa (Pouyat ym. 2006, Cambou ym. 2018). Isossa-Britanniassa Leicesterin C-tiheys vaihtelee välillä 6 – 13,5 kg/m² (syvyydet 15 – 100 cm) merkiten suurimmillaan 6-kertaista eroa (Edmondson ym. 2012), ja Kiinan Nanjingissa, Yixingissä ja Urumqissa C-tiheys vaihtelee välillä 2,35 – 5,36 kg/m² (20 ja 80 cm syvyydet) merkiten suurimmillaan 2,4-kertaista eroa (Wei ym. 2014a, Wei ym. 2014b, Yan ym. 2015). Typen tiheyksien osalta saatavilla oleva tutkimusaineisto on suppeampi mutta vaihtelee niin ikään suhteessa Helsingissä havaitsemiini (0,07 kg/m²) arvoihin. Yllä mainituissa tutkimuksissa New Yorkin N-tiheys (0,01 kg/m²) on 4,7 kertaa Helsingin arvoja pienempi (Raciti ym. 2012), Alabaman (0,1 kg/m²) 1,4 kertaa suurempi (Majidzadeh ym. 2018) ja Yixingin (0,3 kg/m²) 3,8 kertaa suurempi (Wei ym. 2014b). Yllä mainittujen maatyypin välisten hiili- ja typpisuhteiden perusteella Helsingin pinnoitetun kaupunkimaaperän hiili- ja typpihävikin voi todeta olevan huomattavasti lämpimämpien maiden hävikkiä suurempaa.

4.4. Pinnoittamattoman maan kasvihuonepäästöt

Tulokset antavat pohjoismaisen kaupunkisuunnittelun tarpeisiin lisätietoa kaupunkimaaperän hiilidioksidisidonnasta sekä pinnoitetun ja pinnoittamattoman maan eroista hiili- ja typpipitoisuuksissa ja biogeokemiallisissa toiminnoissa. Kasvihuonekaasujen osalta tarvitaan kuitenkin lisää tutkimustietoa tekijöistä, jotka vaikuttavat niiden sitoutumiseen ja toisaalta vapautumiseen maaperästä ilmakehään. Hiilidioksidia muodostuu orgaanisen aineen hajotuksessa, ja hajotuksen suuruus riippuu mm. orgaanisen aineen määrästä ja laadusta sekä maaperän lämpötilasta, kosteudesta ja ravinnetaloudesta (Swift ym. 1979). On myös ristiriitaista tietoa siitä, toimiiko kasvillisuus hiilinieluna vai päästölähteenä:

Velasco ym. (2016) havaitsivat, että kasvien ja maaperän muodostama biogeeninen kokonaisuus voi toimia joko nieluna tai lähteenä subtrooppisilla kaupunkialueilla. Hiilitaseen suunta oli riippuvainen puulajista sekä kasvuston yhteydessä olevan pinnoituksen määrästä ja vaikutuksesta maahengitykseen. Lisäksi vihermaiden ylläpito koneilla, lannoitteilla ja kastelulla voi aiheuttaa hiilidioksidin ja dityppioksidin (N₂O) päästöjä (Lorenz & Lal 2009, Churkina ym. 2010).

Pinnoitettu maa saattaa tarjota ekosysteemipalvelun sillä oletuksella, että kaasujen tulon lisäksi pinnoite voi vähentää kaasujen poistumista syvältä rakennusmaan alaisesta, luonnollisesta maasta sekä läheisestä pinnoittamattomasta maasta. Tätä tukee aiempi toteamus, että mikäli pinnoiteala on riittävän kapea ja sijaitsee viherkaistaleiden yhteydessä, voivat pinnoitetun maaperän hiilivarastot muodostaa kohtuullisen osuuden kaupungin kokonaisvarannoista (Edmondson ym. 2012). Tutkimustuloksiani ei voi kuitenkaan tarkastella tästä näkökulmasta, sillä näytteeni kerättiin paikoista, jotka olivat selkeästi erillään kasvillisuudesta. Lisäksi tulisi selvittää, kuinka suuri osuus syvältä maaperästä lähtöisin olevalla maahengityksellä on maan kokonaishengityksessä tutkittaessa pinnoituksen potentiaalista vaikutusta kaasujen poiston ehkäisyssä. Tulisi myös tietää, kuinka paljon kasvihuonekaasuja on vapautunut luonnollisen pintamaan siirrosta kaatopaikalle, jotta voitaisiin arvioida pinnoitetun maan kokonaistase kasvihuonekaasujen osalta.

4.5. Kaupunkisuunnittelu

Kasvihuonepäästöjä voidaan säädellä päätöksillä pinnoituksen ja vihermaan rakentamisesta ja muokkaamalla olemassa olevia rakenteita. Suunniteltaessa perusmaan poistoa on syytä tarkastella sen tuottavuusastetta ja maankäyttöhistoriaa, jotka selittävät osaltaan hiilipitoisuuksia ja maaperän

biogeokemiallisia ominaisuuksia (Jeehwan & Youngryel 2015). Tällöin välttään hävittämästä potentiaalisesti merkittäviä paikallisia ekosysteemipalveluja ja estetään mahdolliset maansiirron tuottamat kasvihuonepäästöt. Suunnittelun tärkeys korostuu kylmässä ilmastossa, jossa hiiltä ja typpeä katoaa maasta runsaasti kun se korvataan paksulla rakennusmaakerroksella. Kun pinnoitusta asennetaan, on huolehdittava siitä, että sen yhteydessä on riittävästi viherkaistaleita ja ettei sen yhtenäinen pinta-ala kasva liian suureksi. Juurten päästessä pinnoitemaahan ainakin osa sen ainekierrosta ja abioottisista ominaisuuksista elpyy (Edmondson ym. 2012, Majidzadeh ym. 2018). Pinnoitemateriaalia valittaessa on huomioitava siitä mahdollisesti irtoavat yhdisteet. Alkalisoivien yhdisteiden lisäksi esimerkiksi asfaltista voi irrota rikkiä maaperään (Kida & Kawahigashi 2015). Tyypillisille pinnoitusmenetelmille löytyy myös läpäisevämpiä vaihtoehtoja, kuten huokoinen asfaltti, läpäisevä betoni ja lomitettavat mukulakivet. Kasvihuonesäätelyn lisäksi tekniikat edistävät samanaikaisesti kaupunkitoimintoja ja läpäisyn tuomia palveluja, kuten lämpö- ja ilmansaastesaarekkeiden ja tulvimisen ehkäisyä (Kida & Kawahigashi 2015). Viheralueita suunniteltaessa on suositeltavaa, että istutettavien kasvilajien, kohdemaaperän ja niiden ylläpidon ilmastovaikutukset tunnettaisiin riittävän hyvin. Lisäksi joutomaita ja suljettuja kaatopaikkoja voidaan muuttaa puistoiksi tai metsäalueiksi, jolloin syntyy uusia elinympäristöjä ja ekologisia funktioita, toisin sanoen ekosysteemipalveluja (Yuno ym. 2014).

5. Johtopäätökset

Tutkimustulokseni vahvistavat käsityksiä pinnoituksen haitallisesta vaikutuksesta maaperän kykyyn sitoa hiili- ja typpiyhdisteitä: hiili ja typpi ovat selvästi vähäisempiä pinnoitetussa maassa verrattuna pinnoittamattomaan, ja niiden kokonaismäärät vähenevät pinnoitteen lisääntyessä. Samalla tulokset antavat ilmiöstä uutta tietoa kylmässä ilmastossa, jossa paksumpi rakennusmaakerros

voimistaa pinnoitetun maan hiili- ja typpikatoa selvästi voimakkaammin kuin lämpimämmissä ilmasto-oloissa. Pinnoitetun ja pinnoittamattoman maan tasapainoisempi suhde, yhtenäisen pinnoitealan rajoittaminen, läpäisevämmät pinnoitemateriaalit ja maaperän paikallisten vuorovaikutusten hyvä tuntemus kuuluvat ratkaisuihin, joilla pinnoitetusta maaperästä ja kaupunkimaaperästä kokonaisuudessaan saadaan tuottavampia ja käyttökelpoisempia ilmastomuutoksen hillinnässä.

6. Kiitokset

Valtaiset kiitokseni saavat ohjaajani Heikki Setälä, Changyi Lu ja Johan Kotze ammattimaisesta kärsivällisyydestään kaikissa mutkissa ja käänteissä. Kiitän myös Helen Oy:tä näytteenottopaikkojen tiedonannoista ja varustelainasta sekä äitiäni kyytiavusta näytteenottopaikkoja etsittäessä ja arvioitaessa.

7. Lähteet

- Edmondson, J. L., Davies, Z. G., McHugh, N., Gaston, K. J. & Leake, J. R. 2012: Organic carbon hidden in urban ecosystems. — *Scientific Reports* 2: 963.
- Cambou, A., Shaw, R. K., Huot, H., Vidal-Beaudet, L., Hunault, G., Cannavo, P., Nold, F. & Schwartz, C. 2018: Estimation of soil organic carbon stocks of two cities, New York City and Paris. — *The Science of the Total Environment* 644: 452–464.
- Churkina, G., Brown, D. G. & Keoleian, G. 2010: Carbon stored in human settlements: the conterminous United States. — *Global Change Biology* 16: 135–143.
- Haapoja, T. 2019: Maankosteus. <http://www.hiilipuu.fi/fi/artikkelit/maankosteus>
- Hu, Y., Dou, X., Li, J. & Li, F. 2018: Impervious Surfaces Alter Soil Bacterial Communities in Urban Areas: A Case Study in Beijing, China. — *Frontiers in Microbiology* 9: 226.
- Jeehwan, B. & Youngryel, R. 2015: Land use and land cover changes explain spatial and temporal variations of the soil organic carbon stocks in a constructed urban park. — *Landscape and Urban Planning* 136: 57–67.

- Kida, K. & Kawahigashi, M. 2015: Influence of asphalt pavement construction processes on urban soil formation in Tokyo. — *Soil Science and Plant Nutrition* 61: 135–146.
- Lorenz, K. & Lal, R. 2009: Biogeochemical C and N cycles in urban soils. — *Environment International* 35: 1–8.
- Majidzadeh, H., Lockaby, B. G., Price, R. & Governo, R. 2018: Soil Carbon and Nitrogen Dynamics beneath Impervious Surfaces. — *Soil Science Society of America Journal* 82: 663–670.
- Majidzadeh, H., Lockaby, B. G. & Governo, R. 2017: Effect of home construction on soil carbon storage-A chronosequence case study. — *Environmental Pollution* 226: 317–323.
- Pouyat, R. V., Yesilonis, I. D. & Nowak, D. J. 2006: Carbon Storage by Urban Soils in the United States. — *Journal of Environmental Quality* 35: 1566–1575.
- Raciti, S. M., Hutyra, L. R. & Finzi, A. C. 2012: Depleted soil carbon and nitrogen pools beneath impervious surfaces. — *Environmental Pollution* 164: 248–251.
- Setälä, H. M., Francini, G., Allen, J.A., Hui, N., Jumpponen, A. & Kotze, D.J. 2016: Vegetation Type and Age Drive Changes in Soil Properties, Nitrogen, and Carbon Sequestration in Urban Parks under Cold Climate. — *Frontiers in Ecology and Evolution* 4: 93.
- Scalenghe, R. & Marsan, F. A. 2009: The anthropogenic sealing of soils in urban areas. — *Landscape and Urban Planning* 90: 1–10.
- Swift, M. J., Heal, O. W., & Anderson, J. M. 1979: *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. 1. painos. — Blackwell Scientific Publications, Oxford. 372 s.
- Velasco, E., Roth, M., Norford, L. & Molina, L. T. 2016: Does urban vegetation enhance carbon sequestration? — *Landscape and Urban Planning* 148: 99–107.
- Wei, Z. Q., Wu, S. H., Zhou, S. L., Li, J. T. & Zhao, Q. G. 2014a: Soil organic carbon transformation and related properties in urban soil under impervious surfaces. — *Pedosphere* 24: 56–64.
- Wei, Z. Q., Wu, S. H., Yan, X. & Zhou, S. 2014b: Density and Stability of Soil Organic Carbon beneath Impervious Surfaces in Urban Areas. — *PLoS ONE* 9: e109380.
- Xiong, X., Grunwald, S., Myers, D. B., Ross, C. W., Harris, W. G. & Comerford, N. B. 2014: Interaction effects of climate and land use/land cover change on soil organic carbon sequestration. — *Science of the Total Environment* 493: 974–982.
- Yan, Y., Kuang, W., Zhang, C. & Chen, C. 2015: Impacts of impervious surface expansion on soil organic carbon – a spatially explicit study. — *Scientific Reports* 5: 17905.
- Yuno, D., Ji, K., Gu-Yeon, K. & Gea-Jae, J. 2014: Importance of closed landfills as green space in urbanized areas: ecological assessment using carabid beetles. — *Landscape and Ecological Engineering* 10: 277–284.

Zhao, S., Zhu, C., Zhou, D., Huang, D. & Werner, J. 2013: Organic Carbon Storage in China's Urban Areas. — *PLoS ONE* 8: e71975.